"智路巡守"——基于众包与专业数据融合的道路网智能巡检平台研究报告

吴宗河 [1]　游裕添 [1]　林辰新 [1]　刘子通 [1]　周文康 [1]　胡君豪 [1]　王茵 [1*]　付鑫 [1*]

（1. 长安大学，西安 710064）

摘要：

为了克服商用道路巡检车辆行驶路线的不确定性及固定区域内道路巡检覆盖的不完整性，本研究开发了基于众包与专业数据融合的道路网智能巡检平台。平台利用商用车辆上搭载的视觉识别设备对道路网进行巡检，并通过 Google Or-Tools VRP 求解器生成最优巡检路线；使用 YOLO11 算法判定道路病害的严重程度，并据此划分路段修复优先级，生成智能检修方案；生成定期巡检报告，对周期内的巡检情况和路面病害数据进行详细统计和上报。平台提供了优化后的巡检路线，减少了巡检车辆使用频次，提高了巡检效率，增强了路面维护的响应速度。平台依赖于商用车辆的巡检频率，在商用车辆较少时巡检效果可能会有所下降。本研究为道路网智能巡检提供了高效的解决方案，有助于提高道路维护的快速性和科学性，降低道路养护巡检的成本。

关键词：智能巡检平台　道路维护　众包数据　视觉识别　路径优化

分类号：U418

"Smart Road Patrol and Guard" - Research Report on Intelligent Inspection Platform for Road Networks Based on Crowdsourcing and Specialized Data Fusion

Zonghe Wu[1], Yutian You[1], Chenxin Lin[1], Zitong Liu[1], Wenkang Zhou[1], Junhao Hu[1], Yin Wang[1*], Xin Fu[1*]

(1.Chang'an University, Xi'an 710064)

Abstract:

In order to overcome the uncertainty of the traveling routes of commercial road inspection vehicles and the incompleteness of the road inspection coverage in a fixed area, this study develops a road network intelligent inspection platform based on crowdsourcing and professional data fusion. The platform utilizes the visual recognition equipment equipped on commercial

---

*通讯作者。电子邮箱：fuxin@chd.edu.cn（付鑫），wangyin@chd.edu.cn（王茵）。

vehicles to inspect the road network, and generates the optimal inspection routes through the Google Or-Tools VRP solver; uses the YOLO11 algorithm to determine the severity of road damage, and accordingly divides the repair priority of road sections and generates an intelligent maintenance program; generates a regular inspection report, and carries out detailed statistics and reports on the inspection situation and pavement damage data during the cycle. The platform provides optimized inspection routes, which reduces the frequency of inspection vehicles, improves inspection efficiency and enhances the response speed of pavement maintenance. The platform relies on the inspection frequency of commercial vehicles, and the inspection effect may be reduced when there are fewer commercial vehicles. This study provides an efficient solution for intelligent inspection of road networks, which helps to improve the rapidity and scientificity of road maintenance and reduce the cost of road maintenance inspections.

Keywords: Intelligent Inspection Platform, Road Maintenance, Crowdsourced Data, Visual Recognition, Path Optimization

目 录

“智路巡守”——基于众包与专业数据融合的道路网智能巡检平台

一、 项目简介

为了克服商用道路巡检车辆行驶路线的不确定性及固定区域内道路巡检覆盖的不完整性，本项目开发了一种**网页应用系统**，在固定周期内利用商用车辆上搭载的视觉识别设备，对道路网进行巡检，并为其快速制定补充的专业道路巡检方案。目前道路巡检养护管理工作中，可以**利用商用车辆**开展巡检，但商用巡检车辆行驶路线不确定、固定区域内路网覆盖不完整，导致巡检结果不能得到充分的利用。且巡检方案需要人为制定，不仅缺少专业化和科学化的决策，还存在一定程度上的滞后性。鉴于此，本项目开发的系统通过 **Google Or-Tools VRP 问题求解器**生成覆盖未巡检区域和需复检区域的**最优巡检路线**；利用 **YOLO11 视觉识别算法**判定道路病害的严重程度，并据此**划分路段修复优先级**，生成智能检修方案；生成**定期巡检报告**，对周期内的巡检情况和路面病害数据进行详细统计和上报。其实现了最小化行驶距离和巡检车辆的使用频次，提高了道路紧急维护的响应速度，增强了路面巡检的灵活性和效率，可帮助用户高效地完成巡检周期。

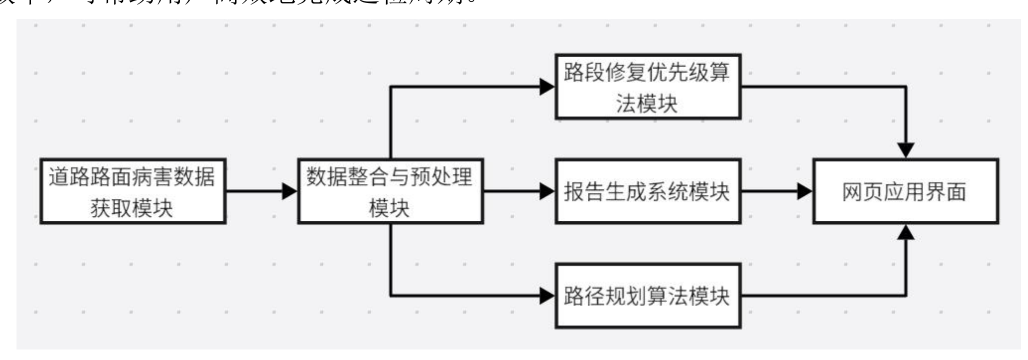


图 1 本项目系统框架设计方案

二、 项目相关研究现状及发展动态

2.1 研究现状

随着城市化进程的加快，市政道路的使用强度和复杂度不断提高，道路的病害问题也日益突出，及时发现、记录并处理道路病害给市政管理和养护带来了巨大的挑战。[1]为了提高道路养护的效率和质量，研究者们开始利用先进的信息技术和算法，以求实现对道路状况的实时监测、分析和预警，以及对道路养护任务的自动分配、调度和执行，从而减少人工干预，实现决策最优化，降低成本，提升养护效率，提高养护管理水平，降低养护成本[2]。

2.1.1 国内现状

道路养护工程是一项长期性、日常性的工作，所需资金较大、如何配置养护资源一直是道路管理者的主要议题。目前，养护决策缺乏数据支撑，科学化程度低[4]。且目前道路巡检

主要依靠专业巡检车辆获取路面病害图像信息，并对病害图像进行分析识别，虽然一定程度上减轻了道路巡检部门的巡检工作，但专业**巡检车辆数量少、巡检路径不稳定**，需要**耗费大量时间成本、人工成本、设备成本**[5]。

为解决上述问题，张月（2019）提出了一种基于行车记录仪的高速公路路面状况巡查及报警系统，使用道路病害智能巡查车上搭载的行车记录仪高效采集路面数据；其结合先进的AI图像识别技术，可以实时、快速地检测路面病害和设施状态[6]。傅志浩等（2018）和王九胜等（2020）指出，随着物联网技术、云计算、大数据、移动互联网、5G网络和AI等新一代信息技术的快速发展，公路智能化养护迎来了新的发展热潮。全国各地的公路养护部门纷纷开始建设信息化公路养护平台[4,7]。王久胜等（2020）还提出了一种“互联网＋道路养护平台”的应用。杨盼盼（2021）分析了智慧交通下的智能道路养护现状，提出了一种智慧养护作业安全方案。闫玉芳（2024）分析了智慧交通下的智能道路养护现状，提出了道路养护工作中的各个系统的作用。

道路病害智能巡查车、智慧养护作业安全方案[8]及“互联网＋道路养护平台”的应用[4]，通过高准确度检测、高精度定位、一键事故上报和智慧施工标志，显著提升了道路养护的安全性和效率。然而，数据不完整不充分、资源调配不足和管理问题依然存在，数据管理混乱、决策科学化程度低、养护工作开展不及时等问题依然存在[4]，需要进一步优化和规范。但总的来说，这些技术创新为公路智能化养护提供了坚实的技术支撑，推动了行业的现代化和信息化进程。

2.1.2 国外研究现状

道路基础设施是重要的资产，在经济发展中发挥着关键作用，特别是在客运和货运方面。道路对交通的安全性、舒适性和成本有重大影响。为了确保道路的最佳状态，必须定期检测其运行状态并进行全面的诊断分析。而最终，专业组织必须制定适当的检测和维护计划（Guan et al.，2023; Liu et al.，2020; Pan et al.，2023; Pourgholamali et al., 2023; Yang et al., 2021; Zhang et al., 2023）。然而，目前解决各种道路病害的方法分散，导致道路维护质量低下、成本高昂和效率低下。因此，开发一种包括道路检测和维护在内的综合方法至关重要(Yang X et al., 2024)。

在道路巡检所需算法方面，国外应用较早，目前已有成熟的VRP问题求解器，例如本项目所开发的系统所使用的Google Or-Tools VRP问题求解器。其包含多种算法实现，包括引导式本地搜索，模拟退火和禁忌搜索[19]。**VRP问题（车辆路径问题）**是一个组合优化和整数规划问题，其基本描述为:“为了交付给定的一组客户，车辆车队的最佳路线集是什么？”[22]。其最初由Dantzig G B等人（1959）提出，并将其应用于汽油交付[22]。

Wang H S等人（2013）提出了一种约束规划模型，其基于 VRP问题设置，并增加了强制性巡检路段，并在巡检期间允许路径通过小道路以减少时间消耗。通过采用约束规划（CP） 技术和优化解决方案机制来构建巡检调度模型，目标是最大限度地减少道路巡检的时间消耗。该模型可以作为参考，支持政府有效地为巡检过程分配资源，并达到缩短巡检时

间消耗的目标。Li Y 等人（2023）研究了公路场景下自动机场派遣无人机的自动巡检业务，其首先根据公路曲线设置了无人机的巡检路径点，然后针对非线性非凸参数优化问题提出了一种高效的启发式方法，通过该方法规划了无人机的巡检高度、悬停高度和飞行速度等参数。仿真和分析表明，其所提出的方法具有良好的参数规划效率。Woo S 等人（2016）提出了一个框架，在路面状态预测与交通流量数据和更机械的劣化模型定义的风险边界内优化灵活的检测计划。结果验证了优化检测方案优于两种传统检测方案。此外，由于定期检查存在不确定性风险，因此在不同交通情况下，优化检查比定期检查更稳健。

三、 项目实施的目的、意义

3.1 实施目的

目前道路巡检主要依靠专业巡检车辆获取路面病害图像信息，并对病害图像进行分析识别，一定程度上减轻了道路巡检部门的巡检工作。但专业**巡检车辆数量少、巡检路径不稳定**，需要**耗费大量时间成本、人工成本、设备成本**[5]。因此，目前道路巡检养护管理工作中，可以**利用商用车辆**开展巡检，但商用巡检车辆行驶路线不确定、固定区域内路网覆盖不完整，导致巡检结果不能得到充分的利用。且巡检方案需要人为制定，不仅缺少专业化和科学化的决策，还存在一定程度上的滞后性。鉴于此，本项目开发的系统通过 Google Or-Tools VRP 问题求解器生成覆盖未巡检区域和需复检区域的**最优巡检路线**；利用 **YOLO11 视觉识别算法**判定道路病害的严重程度，并据此**划分路段修复优先级**，生成智能检修方案；生成**定期巡检报告**，对周期内的巡检情况和路面病害数据进行详细统计和上报。

3.2 实施意义

3.2.1 社会意义

近年来因**道路破损引发交通事故**例子时有发生，2021 年 9 月 25 日，张某驾驶轿车行驶至山东平阴县某路段时，因路面凹陷且相关部门未及时发现并处理，凹陷处无任何警示标志，导致车辆左侧两个轮胎爆胎[33]。随着国家道路网络的逐渐形成与完善，道路巡检养护管理工作的重要性逐渐增加。为提高道路养护效率和质量，需要**利用信息技术和算法**实现道路状况实时监测、分析、预警，自动分配、调度、执行养护任务，降低成本，提升管理水平，达到及时发现，及时处理的道路维护标准。

3.2.2 应用意义

道路巡检技术在近年来得到了**广泛应用**，并且随着设备和算法的不断精进，其应用领域也在不断扩展。以下是一些具体的应用场景和技术进展：

自动驾驶感知技术：例如，腾讯自动驾驶团队开发的智能巡检方案在深圳市交通运输局福田管理局的道路上应用，显著提升了巡检效率和准确性。

北斗+AI 技术：在山东临沂，北斗+AI 公路智能巡检系统“千寻驰观”被部署，用于识别道路病害及周边设施，提升了巡检效率和安全性。

图像识别和数据分析：通过摄像头捕捉道路图像，利用图像处理和人工智能算法进行分析，检测道路上的问题，如裂缝、坑洼和标线破损等[34]。

这些技术的应用不仅提高了道路巡检的**效率和准确性**，还**降低了人力成本和安全风险**。未来，随着技术的进一步发展，道路巡检将变得更加智能化和自动化，为交通安全和管理提供更有力的支持。

3.2.3 科学意义

目前实际情况中较频繁出现道路路面病害巡检路线的**不确定性，不完整性以及不及时性**的问题，仅依靠专业巡检车辆难以完整覆盖指定范围内所有路线，且成本较高。众包和专业相结合的方式通过高效预处理数据和先进的算法优化道路巡检过程，达到收集和预处理道路病害数据，**快速、高效**地规划较经济的巡检路径，并确定病害检修的优先级，清洗和分类数据，并通过一个报告生成系统**一键生成定期巡检报告**，从而**显著提升**道路病害管理的质量和效率。同时众包数据源与专业数据源相融合的道路病害数据源，**数据来源多样**，能够**节省**道路病害巡检的**人工成本和时间成本**。

项目所用的 Google Or-Tools 优化算法软件套件是国外成熟的用于组合优化的快速且可移植的开源软件套件，已经过**上百次实际应用检验**[19]。其中的 VRP 问题求解器可以定期解具有数万个节点的 TSP 实例[19]。项目所用的 YOLO11 是一种机器视觉识别算法，用于实时对象检测和图像分割[27]。其具有较强的特征提取能力，高空间注意力，高适应性和优秀的性能表现[27]。YOLO11 对比不同的机器视觉识别算法，其**表现优异**（图 2）[36]。

Model	mAP@0.5	mAP@0.75	mAP@[0.5:0.95]
YOLOv8	73.9%	64.5%	45.2%
YOLOv10	74.3%	65.2%	46.7%
YOLOv11	76.8%	68.1%	48.5%

图 2 YOLOv8、YOLOv10 和 YOLOv11 在不同交并比阈值下的平均精度比较[36]

四、 项目研究内容和拟解决的关键问题

4.1 项目研究内容

本项目主要的研究内容包括：

（1） 选择合适的**路径优化算法、路段修复优先级算法**；开发道路路面病害数据获取模块，数据整合与预处理模块。

（2） 将**众包数据**（即商用车辆的行驶数据和其上搭载的商用小型化视觉识别设备识别的道路病害图像数据）与**专业巡检数据**结合，以实现道路病害数据采集的全面覆盖和数据处理的专业化。

（3） 开发**用户友好的网页应用界面**。开发定期巡检报告一键生成系统，对周期内的巡检情况和路面病害数据进行详细统计和上报。

4.2 拟解决的关键问题

目前道路巡检实际应用非常复杂，特别是考虑到现实道路节点多、路网密集的情况，需要本项目开发的系统**能够处理大规模路网数据**。众包来源的道路病害识别数据繁杂，数据格式，病害类型、面积，影响的道路等级等多种多样；且在商用车较多的情况下，商用车未巡检的路段较为破碎。因此，需要本项目开发的系统**能够进行高效的数据清洗**。在病害种类繁多的情况下，传统养护工作中主观判断病害优先级的方式容易造成人为判断误差带来的修复延误，维护效率低。因此，需要本项目开发的系统**对道路病害危害程度进行快速识别与排序**。

五、项目研究与实施的基础条件

5.1 研究条件

当前，国内外计算机技术的迅猛发展为本项目提供了坚实的基础。现代计算机的性能足以支持复杂算法的运行和大规模数据的处理，能够满足高效路径优化和大图计算的需求。此外，巡检设备和算法在近年来也得到了显著的提升。在巡检设备方面，国内已有成熟的商用设备，如云南航天工程物探检测股份有限公司（2017-2023）开发的“路面巡检设备”和“车载三维成像探地雷达”[41]。在道路巡检所需算法方面，国外应用较早，目前已有成熟的 VRP 问题求解器，例如本项目所开发的系统所使用的 Google Or-Tools VRP 问题求解器。在视觉识别领域，广泛应用的技术如 YOLO 系列算法等，已在道路病害检测和分类中表现出较高的准确率和实时处理能力[27]。

5.2 实施条件

5.2.1 设备条件

本项目所需的**数据基础雄厚**。本项目所需的商用车上搭载的商用小型化视觉识别设备上面运行的一种路面病害视觉识别检测算法输出的道路路面病害图像数据，商用车上搭载的商用小型化视觉识别设备输出的病害经纬度坐标、发现时间，以及待分析路网数据均容易在互联网上获取。例如道路路面病害图像数据可以从开源数据集（Mandal V et al, 2020）中获取，病害经纬度坐标、发现时间等可以用简单的代码随机生成，而待分析路网数据则可以使用开放街道地图（OpenStreetMap）提供的开源路网数据[35]。团队现已购买多台**高性能计算机**，能够完成该项目所需的多种复杂算法。近年来，在巡检设备方面，国内已有成熟的商用设备，如云南航天工程物探检测股份有限公司（2017-2023）开发的“路面巡检设备”和“车载三维成像探地雷达”[41]。这一进展为本项目提供了所需的**商业视觉识别设备基础**。

5.2.2 技术实现条件

随着物联网技术、云计算、大数据、移动互联网、5G 网络和 AI 等新一代信息技术的快速发展，公路智能化养护迎来了新的发展热潮。目前路径优化算法研究**已经成熟**，并出现了成熟的 VRP 问题求解器。目前 AI 图像识别技术已经**相对成熟**，结合相应算法，能够有效检

测路面状况，并划分优先级。在道路巡检和优先级划分所需算法方面，目前已有成熟的Google Or-Tools VRP 问题求解器和 YOLO11 视觉识别算法，且都有基于 Python 语言的代码实现，代码简单易懂，**对于本科生来说比较容易掌握运用**。本项目团队**导师的研究方向**为交通运输系统规划，交通运输网络与空间分析、交通大数据技术与应用，且在路径规划算法与路段修复优先级算法方面有良好的研究基础，可以为本项目的顺利实施**提供技术保障**。

5.2.3 政策条件

在**交通强国**的战略背景下，当今中国经济发展迅猛，城镇化建设加速，作为交通基础的路面维护检测成为了愈发重要的问题。

在国务院 2021 年关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知的第五节加强基础设施养护中提到，要落实**交通基础设施全生命周期养护**，强化常态化预防性养护，**科学实施养护作业**，加强养护工程质量检验评定，强化养护管理监管考核，提高基础设施使用寿命。**加大养护新技术推广力度**，建设交通基础设施长期性能科学观测网，**鼓励自动化、信息化巡查**，提高管理养护科学决策水平，推进养护机械化和标准化[38]。

并且在国家交通运输部，“十四五”交通领域科技创新规划中强调，在基础设施领域，围绕推进高质量基础设施建设和构建布局完善、立体互联的交通基础设施网络，提出了研发综合交通运输理论方法与技术、重大基础设施建设关键技术、**基础设施维养及改造技术**、交通基础设施数字化升级关键技术等任务[42]。

六、项目实施方案

6.1 项目主要步骤

首先，开发**道路路面病害数据获取模块、数据整合与预处理模块**，获取病害数据并进行预处理。其次，开发**巡检路径规划算法**，使用随机生成的商用车行驶路径对巡检方案进行试验验证。接着，开发**路段修复优先级评定算法**，并利用城区道路、高速公路等不同等级道路下的病害影像进行实验及结果分析。最后，开发**报告生成系统模块、网页应用界面**，将已巡检路段、未巡检路段、路段修复优先级显示在地图上，并提供一键生成路面病害事件报告和剩余路网巡检方案的功能。

6.2 系统模块设计

6.2.1 道路路面病害数据获取模块

该模块首先在商用车上搭载商用小型化视觉识别设备，上面运行一种**路面病害视觉识别检测算法**。该算法由 Mandal V 等人（2020）提出，他们基于不同的网络骨干部署了最先进的深度学习算法来检测和表征路面病害。他们研究了 CSPDarknet53 、 Hourglass-104 和 EfficientNet 等不同骨干模型的影响，以评估其分类性能。表现最好的模型在 IEEE 全球道路损坏检测挑战赛发布的两个测试数据集上分别获得了 0.58 和 0.57 的 F1 分数（Mandal V et al., 2020）。利用该路面病害视觉识别检测算法，本模块能够快速获取所需的**道路路面病**

害图像数据。接着，上述视觉识别设备以**北斗定位技术**作为基础，将病害的**经纬度坐标、发现时间**记录下来，同时记录商用车每隔五分钟的经纬度坐标。最后，将这些数据打包发送至数据整合与预处理模块。

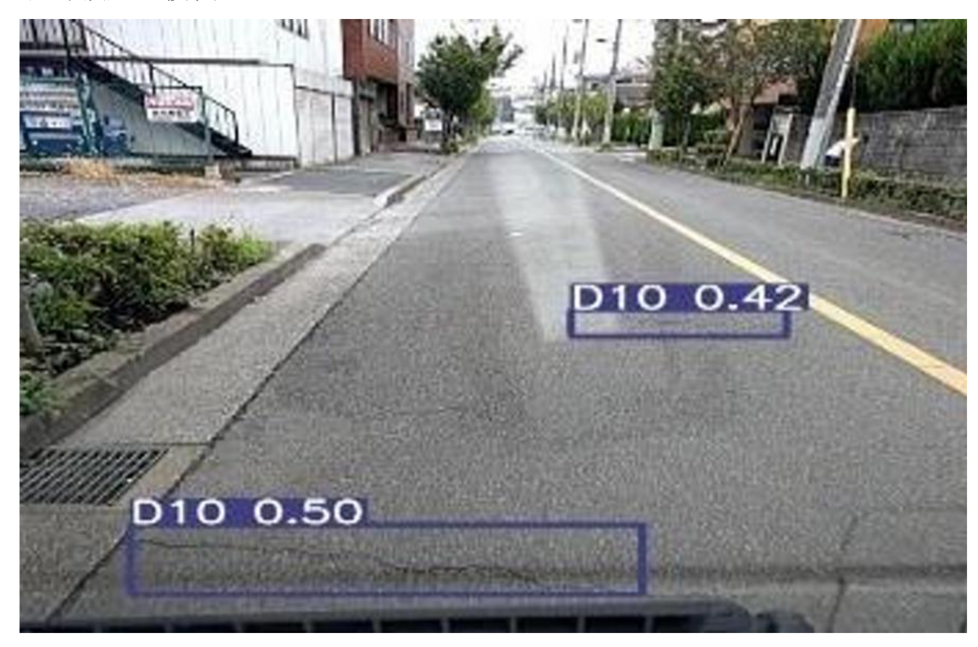


图 3 道路病害数据获取（Mandal V et al., 2020）

6.2.2 数据整合与预处理模块

该模块首先将商用车每隔五分钟的经纬度坐标进行连接，形成商用车行驶路径数据。使用待分析路网数据（如图 4，西安市部分高速路网）构建 **GeoPandas 库中的 GeoDataFrame 和 NetworkX 图**，并利用 **GeoPandas 库**将商用车行驶路径与待分析路网进行对比，提取出**商用车未巡检的路段**。

GeoPandas 是一个开源的 Python 库，用于处理地理空间数据。它结合了两个其他流行的地理空间库，即 Pandas 和 Shapely，提供了一个统一的数据结构来处理地理空间数据。GeoPandas 的**核心数据结构是 GeoDataFrame**，它是 Pandas DataFrame 的扩展，允许存储和处理地理空间几何图形和属性数据[30]。**NetworkX** 是一个用于研究**图**和网络的 Python 库，其由 Hagberg A 等人（2008）提出[31]。它可以方便、快捷地构建**图**和网络，并支持一系列对**图**和网络的分析[31]。在离散数学中，**图**是用于表示物体与物体之间存在某种关系的结构。数学抽象后的“物体”称作节点或顶点，节点间的相关关系则称作边[32]。本模块将道路之间的交叉点作为节点，道路本身作为边，以此来构建 **NetworkX 图。**

如图 5，未巡检路段在商用车较多的情况下较为**破碎**，因此本模块将每段未巡检路段的**中点**作为各个路段的代表，并将中点数据作为节点加入到原路网数据构建的 **NetworkX 图**中，以方便后续的计算与分析。

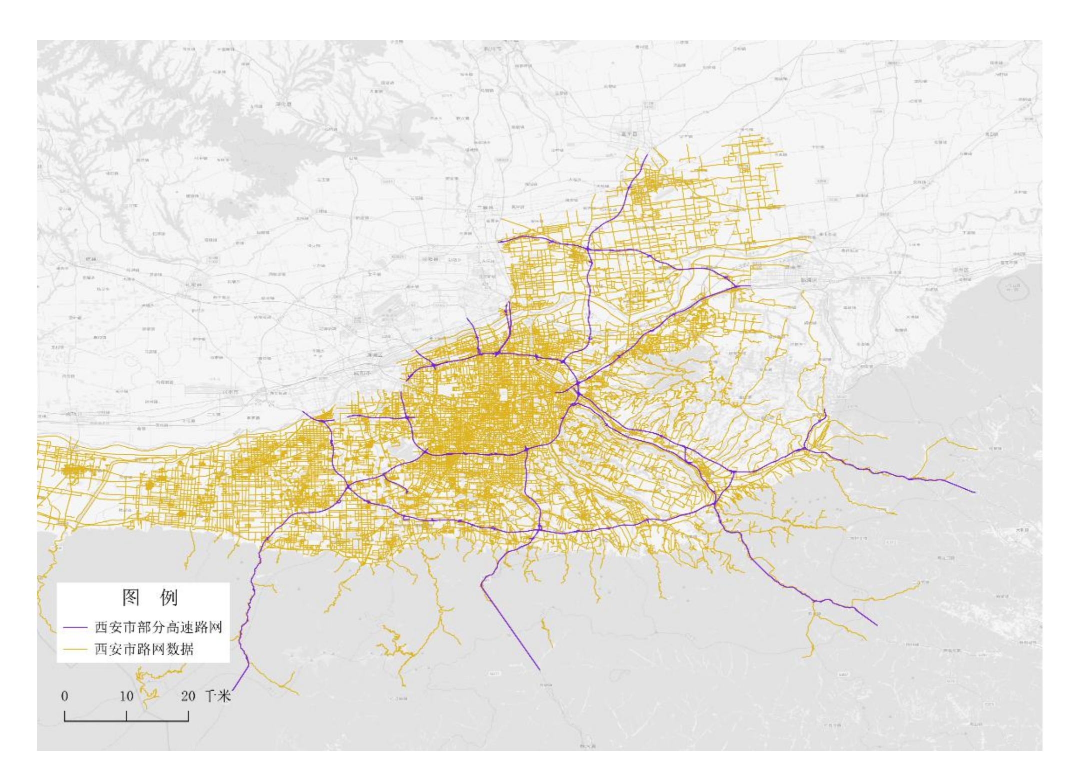


图 4 原始路网数据



图 5 未巡检路段

6.2.3 路径规划算法模块

本模块准备解决的问题为："如何从一个固定起点出发，最高效地使专业道路巡检车辆遍历所有的未被商用车巡检覆盖的路段，最后回到起点？"。该问题与**车辆路径问题（VRP 问题）**相似。VRP 问题是一个组合优化和整数规划问题，其基本描述为："为了交付给定的

一组客户，车辆车队的最佳路线集是什么？”[22]。其最初由 Dantzig G B 等人（1959）提出，并将其应用于汽油交付[22]。

将未巡检路段用各自的中点代表后，道路巡检规划问题便转化为了 VRP 问题。该模块使用 **Google Or-Tools 优化算法软件套件中的 VRP 问题求解器**生成未巡检路段中点的点对点的方向线段，如图 7 所示。本模块使用上述求解器中的**引导式本地搜索**算法对 VRP 问题进行求解。**引导式本地搜索**（图 6）是一种**元启发式算法**，由 Voudouris C（1997）开发[24]。**元启发式算法**是位于**本地搜索算法**之上以更改其行为的算法。**本地搜索算法**是一种启发式算法，用于解决计算困难的优化问题[23]。本地搜索可用于以下问题：在众多候选解中找到一个能最小化某个标准的解[23]。本地搜索算法通过应用局部变化，在候选解空间（搜索空间）内从一个解移动到另一个解，直到找到被认为是最优的解或超过时间限制[23]。**引导式本地搜索**会在搜索过程中建立惩罚机制。它利用惩罚来帮助本地搜索算法摆脱局部最小值和最大值。当给定的本地搜索算法进入局部最优状态时，引导式本地搜索会使用特定方案修改目标函数。然后，本地搜索将使用增强的目标函数运行，该函数的目的是将搜索**带出局部最优解**[24]。

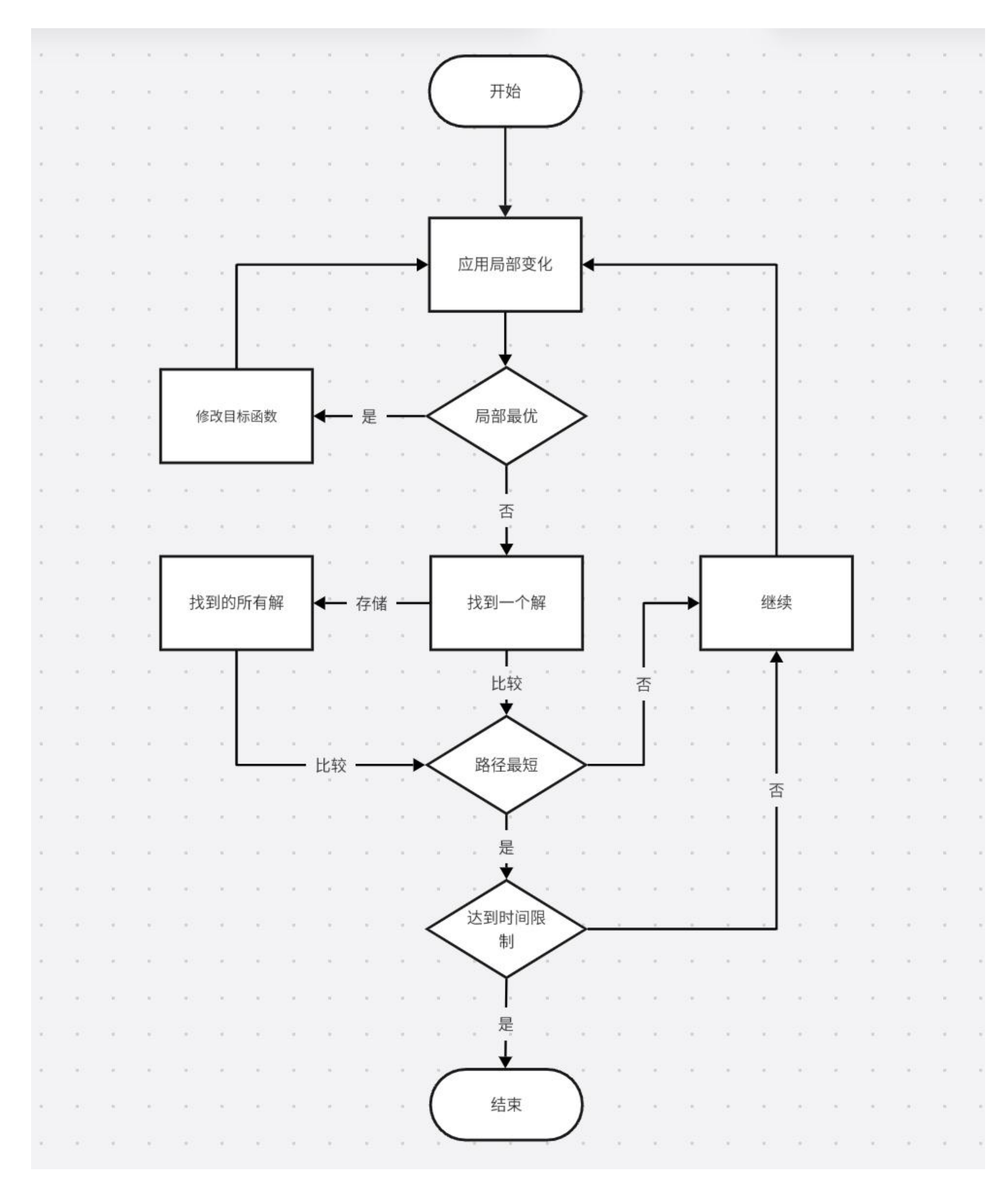


图 6 引导式本地搜索算法流程

引导式本地搜索可以方便、快捷地对 VRP 问题进行求解，且能有效避免算法陷入局部最优解[24]。而 **Google Or-Tools 优化算法软件套件**是国外成熟的用于组合优化的快速且可移植的开源软件套件，已经过上百次实际应用检验。其中的 **VRP 问题求解器**可以定期解具有数万个节点的 TSP 实例[19]。因此，本模块使用该求解器对道路巡检进行路径规划。为评估求解器算法的收敛性、收敛速度、求解效果和稳定性，本模块输出了多车辆平均巡检距离随求解器算法迭代次数的变化（图 8）。结果表明，求解器算法的**收敛性、收敛速度、求解效果和稳定性均良好**。

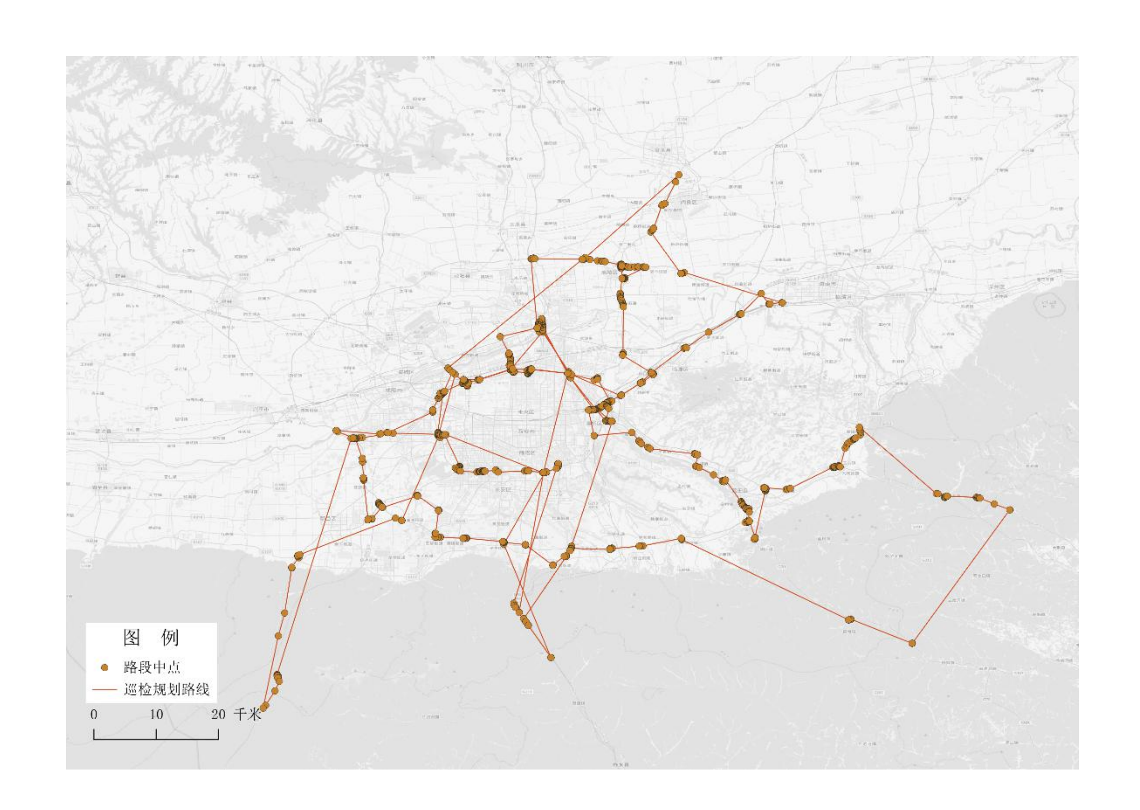


图 7 Google Or-Tools 输出

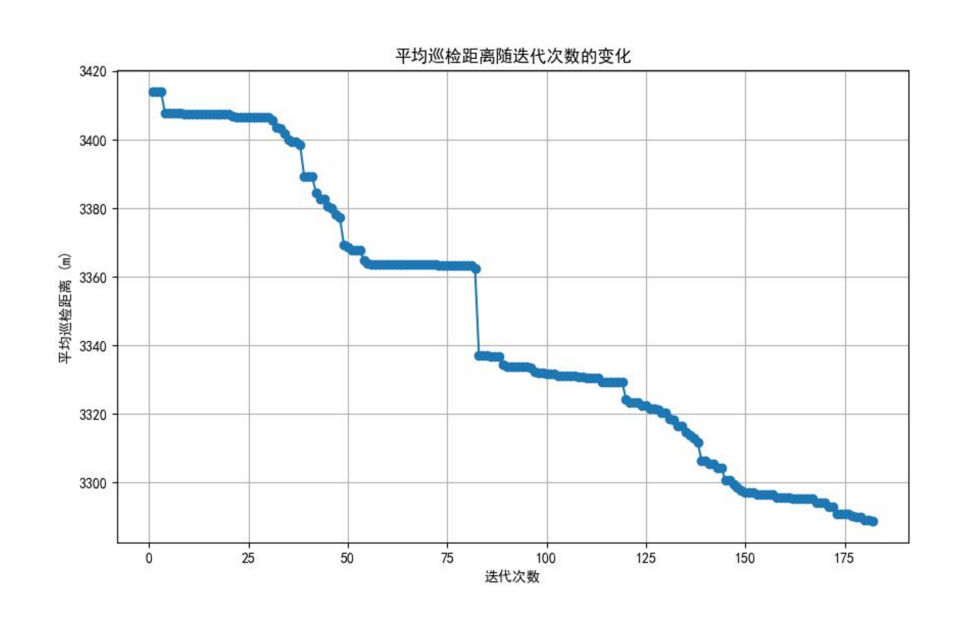


图 8 平均巡检距离随迭代次数的变化

可以发现，Google Or-Tools 输出的路径只是一系列点对点的有向线段，并不沿着现实中的路网（如图 4，西安市路网数据）分布。因此，本模块使用另一个算法找到每两个中点之间的沿现实路网的最短路径。该算法首先使用带中点数据的待分析路网（如图 4，西安市部分高速路网）构建 **NetworkX 图**，并按照 Google Or-Tools 输出路径的顺序和方向，使用 **Dijkstra 算法**计算从一个中点到另一个中点的最短路径。该路径将**沿现实路网分布**。

Dijkstra 算法是由 Dijkstra E W.（1959）开发的一种用于找到两个顶点之间的最短路径的算法。其已被证明与足够高效的堆数据结构相结合时，无论是在运行时间还是比较次数方面都是**普遍最优**的[26]。

最终的输出路径如图 9 所示。由于 Google Or-Tools VRP 问题求解器使用的是启发式算法，为评估算法找到的解的质量，本模块输出了最终巡检路径对于未巡检路径的覆盖率（图 10）。结果表明，多次实验下，最终巡检路径对于未巡检路径的**覆盖率较高**；算法不仅可以**快速地**完成路径规划，还可以找到**质量较高的次优解**。

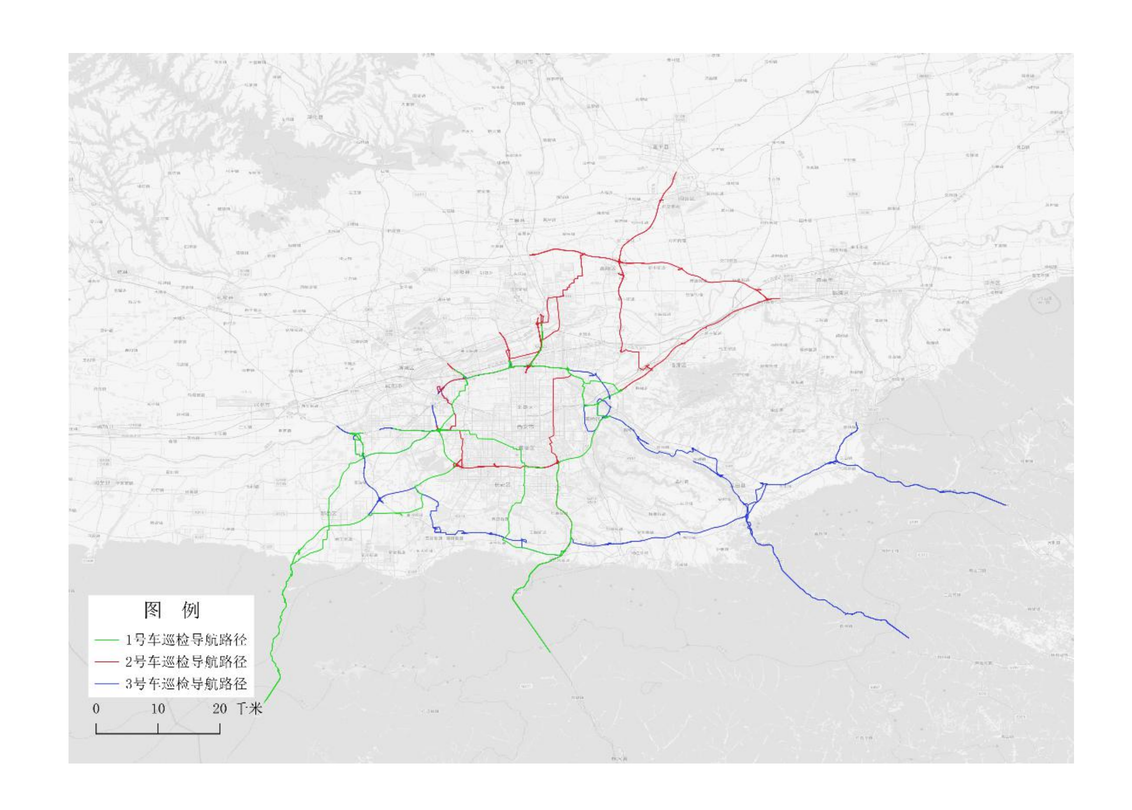


图 9 最终巡检规划

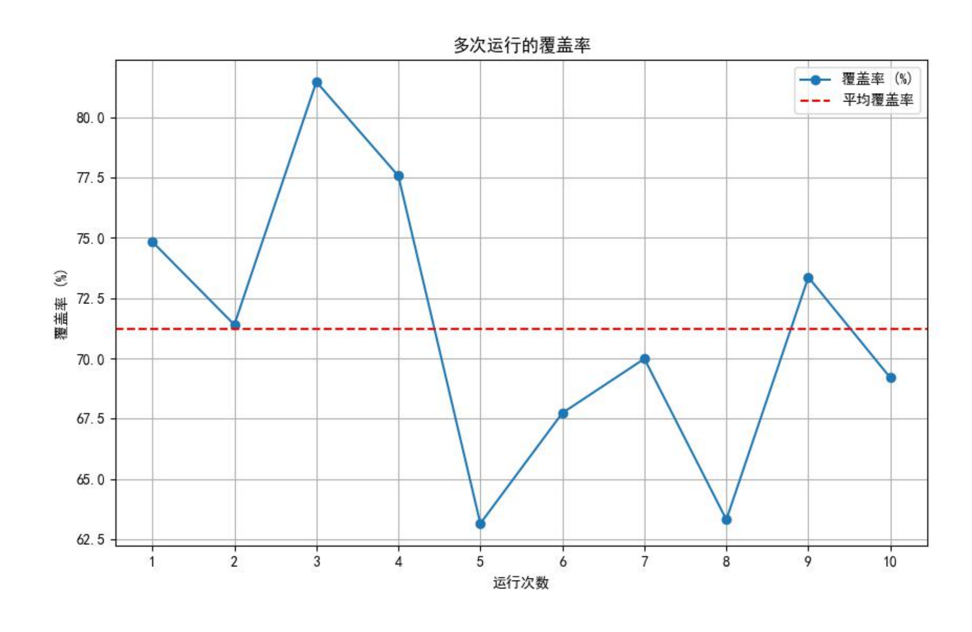


图 10 多次运行的覆盖率

6.2.4 路段修复优先级算法模块

本模块为评定路段修复优先级，使用 **YOLO11 视觉识别算法**（图 11），识别道路路面病害数据获取模块获取的病害图片，提取道路病害类型及面积。本模块以**道路病害类型、道路病害面积和道路等级**作为影响因素，对检测路段进行排序，从而优化检测路径和次序。**YOLO11** 是一种**机器视觉识别算法**，用于实时对象检测和图像分割[27]。



图 11 YOLO11 识别道路病害[27]

项目首先使用 Road Damage Detector 道路病害数据集[44]进行训练，训练的目标识别模型在置信度为 0.5 时的 **F1 分数为 0.84**（图 12），此得分反映出模型在该置信度下能够较好地平衡正确检测病害（召回率）和避免误报（精确率）。这表明该模型在置信度为 0.5 时**表现良好**。

Road Damage Detector 道路病害数据集包含来自日本、印度、捷克共和国、挪威、美国和中国 6 个国家/地区的 47,420 张道路图像[44]。本项目使用其中的 2477 张道路图像进行

模型训练、验证和测试。数据集捕获了**四种类型的道路损坏**，即纵向裂缝（D00）、横向裂缝（D10）、龟裂（D20）和沉陷（D40）[44]。该数据集已作为基于人群感知的道路损坏检测挑战赛 （CRDDC2022） 的一部分发布。该挑战赛 CRDDC2022 邀请来自世界各地的研究人员为多个国家/地区的自动道路损坏检测提出解决方案[43]。

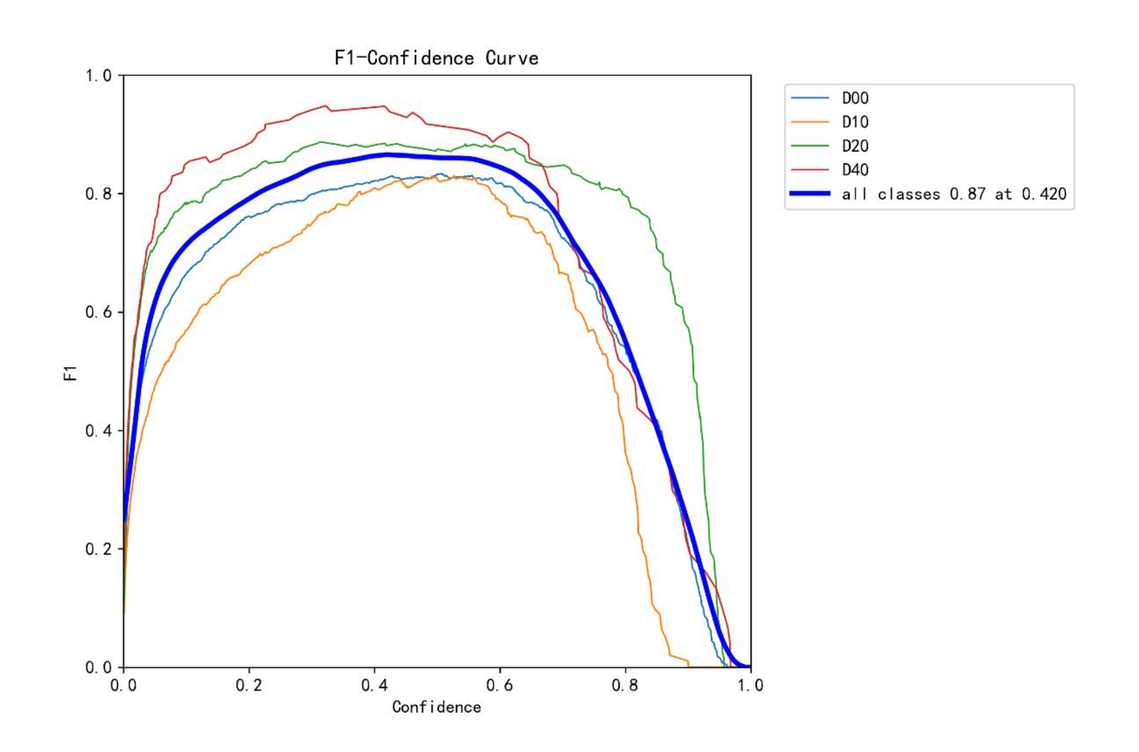


图 12 F1 分数—置信度曲线

本模块使用该目标识别模型对道路病害进行识别，并提取了检测框数据、病害类型数据（图 13）。

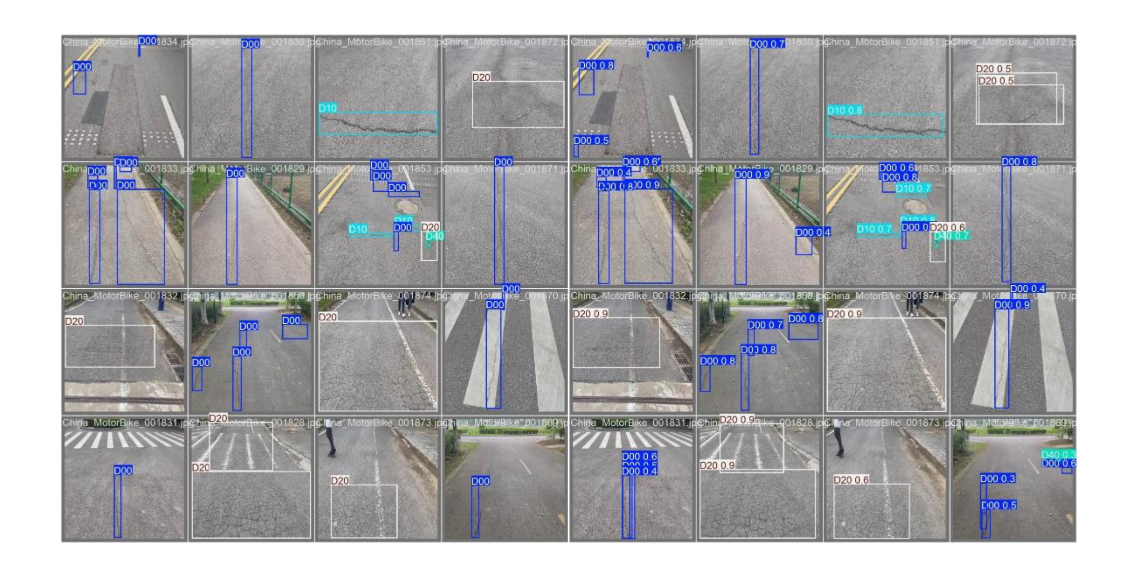


图 13 道路病害目标识别模型验证结果

为了评估病害对道路的影响，本模块使用**《公路技术状况评定标准（JTG 5210—2018）》**中的相关规定对路面技术状况进行评定[45]。路面技术状况应采用**路面技术状况指数 PQI** 评定[45]。本项目只考虑 **PCI（路面损坏状况指数）**与 PCI 在 PQI 中的权重（ w_{PCI} ）对 PQI 进行计算。在这种情况下，PQI 的计算公式如式 1 所示[45]：

$$\mathrm{PQI} = w_{\mathrm{PCI}}\mathrm{PCI} \qquad (1)$$

w_{PCI} 与道路等级、道路路面材料有关[45]。在道路为沥青路面的情况下，高速公路、一级公路的 w_{PCI} 为 0.35，二、三、四级公路的 w_{PCI} 为 0.60；在道路为水泥混凝土路面的情况下，高速公路、一级公路的 w_{PCI} 为 0.50，二、三、四级公路的 w_{PCI} 为 0.60[45]。

路面损坏状况指数（PCI）应按式（2）与式（3）计算[45]：

$$\mathrm{PCI} = 100 - a_0 \mathrm{DR}^{a_1} \qquad (2)$$

$$\mathrm{DR} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{i_0} w_i A_i}{A} \qquad (3)$$

式中：DR——路面破损率（%）；

a_0——沥青路面采用 15.0，水泥混凝土路面采用 10.66；

a_1——沥青路面采用 0.412，水泥混凝土路面采用 0.461；

A_i——第 i 类路面损坏的累计面积（m^2）；

A——路面检测面积（m^2）；

w_i——第 i 类路面损坏的换算系数，见表 1、表 2；

i——路面损坏类型，本项目中为纵向裂缝（D00）、横向裂缝（D10）、龟裂（D20）和沉陷（D40）；

i_0——损坏类型总数，本项目中取 4[45]。

表 1 沥青路面损坏类型及换算系数[45]

类型 i	损坏名称	计算方法（m²）	换算系数 w_i（自动化检测）
1	纵向裂缝（D00）	检测框最长边长度×0.2m	2.0
2	横向裂缝（D10）	检测框最长边长度×0.2m	2.0
3	龟裂（D20）	检测框面积	1.0
4	沉陷（D40）	检测框面积	1.0

表 2 水泥混凝土路面损坏类型及换算系数[45]

类型 i	损坏名称	计算方法（m²）	换算系数 w_i（自动化检测）
1	纵向裂缝（D00）	检测框最长边长度×1.0m	10
2	横向裂缝（D10）	检测框最长边长度×1.0m	10
3	龟裂（D20）	检测框面积	1.0
4	沉陷（D40）	检测框面积	1.0

将 PQI 计算出来后，本模块根据每张图的 PQI 值对病害修复优先级进行排序。本项目提取 Road Damage Detector 道路病害数据集[44]提供的病害标识数据并根据计算出的 PQI 值对病害修复优先级算法的效果进行评估。根据病害修复优先级算法计算出的 PQI 值做的排序结果与真实排序结果相比，**Top-10 准确率为 60%，平均排序误差（Mean Average Rank Error, MARE）为 0.5**。**Top-10 准确率**衡量排序中最重要的病害（如严重程度高的病害）是否排在前面。**平均排序误差**衡量预测的优先级与实际优先级之间的平均排名差异。该指标越低，表示排序越准确。结果表明，本模块算法**能够准确地对道路病害修复优先级进行排序**。

6.2.5 报告生成系统模块

为生成**定期巡检报告**，本模块使用 **python-docx 库**对路段修复优先级算法模块和路径规划算法模块输出的最终巡检路径规划方案与路段修复优先级，以及道路路面病害数据获取模块输出的道路路面病害位置、发现时间等信息**进行整合**，并生成定期巡检报告。**Python-docx 库**(图 12)是用于创建和更新 Microsoft Word (.docx) 文件的 Python 库[28]。其可以快速生成定期巡检报告，对周期内的巡检情况和路面病害数据进行**详细统计和上报**，帮助用户高效地完成巡检周期。

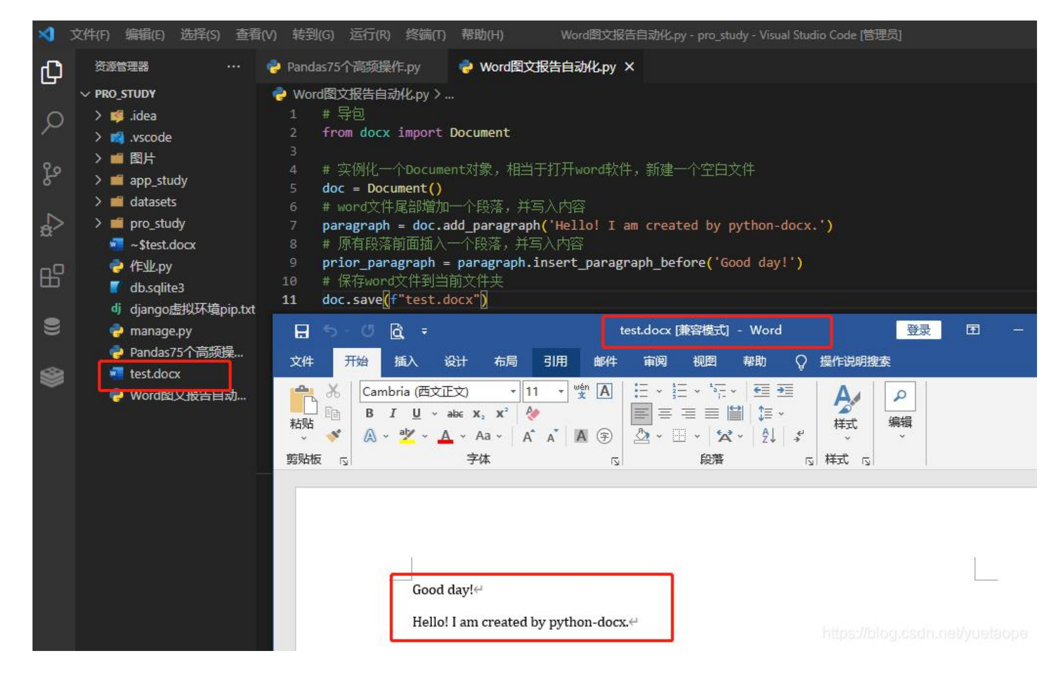


图 15 Python-docx 库[39]

6.2.6 网页应用界面

本模块将**数据整合与预处理模块、路径规划算法模块、路段修复优先级算法模块和报告生成系统模块**作为**后端**。当用户发出开始分析的指令时，将道路路面病害数据获取模块输出的道路路面病害位置、发现时间等信息以及待分析路网数据作为参数输入后端的各模块中，并运行后端。将输出的最终巡检路径规划方案与路段修复优先级**转化为图像数据**，并上传至前端。该图像数据包括**已巡检路段、未巡检路段、路段修复优先级**等数据。将报告生成系统模块输出的 Microsoft Word (.docx) 文件存储起来。当用户需要该报告时，可以立即提供。这样，就提供了**一键生成路面病害事件报告和剩余路网巡检方案**的功能。



图 16 网页应用界面参考[29]

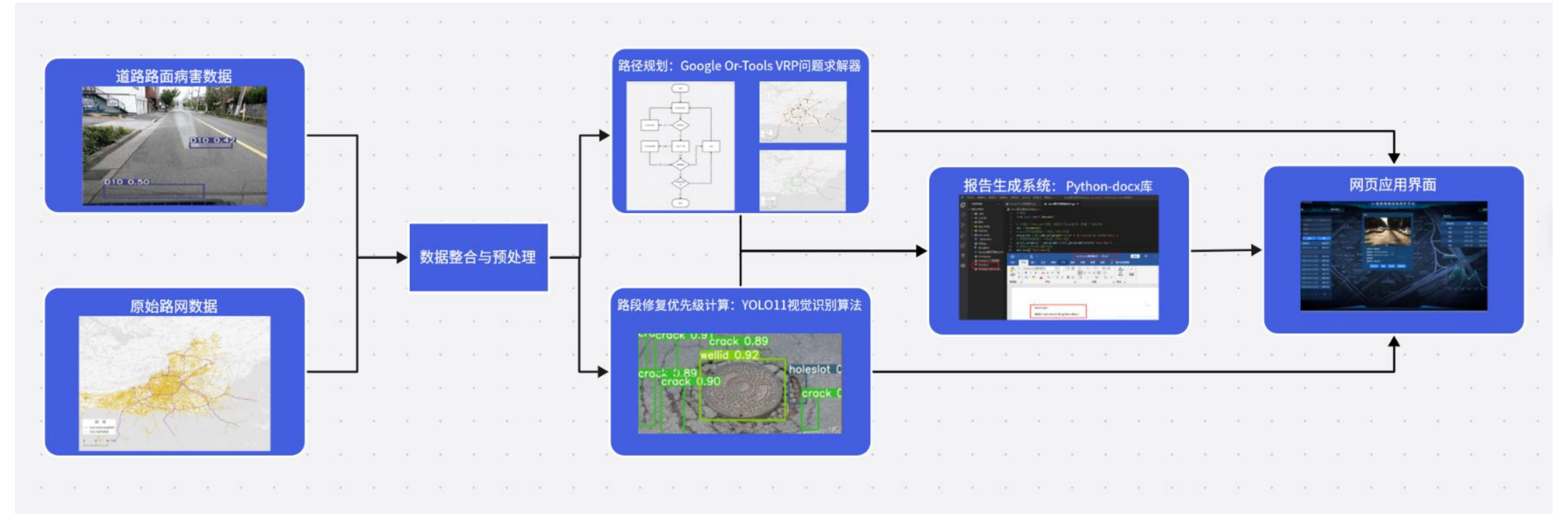


图 17 本项目系统算法设计流程

七、 项目创新点及优势

7.1 项目创新点

7.1.1 众包数据与专业数据融合

目前道路巡检主要依靠专业巡检车辆获取路面病害图像信息，并对病害图像进行分析识别，一定程度上减轻了道路巡检部门的巡检工作。但专业**巡检车辆数量少、巡检路径不稳定**，需要**耗费大量时间成本、人工成本、设备成本**[5]。因此，本项目将**众包数据**（即商用车辆的行驶数据和其上搭载的商用小型化视觉识别设备识别的道路病害图像数据）与**专业巡检数据**结合，实现了道路病害数据采集的全面覆盖和数据处理的专业化。该融合包括以下两个方面：

1）巡检**路线**的融合：本项目先通过商用车辆携带的视觉识别设备，实时收集各个道路的病害图像，实现自动数据采集与反馈，记录下商用车辆已完成巡检的路段，通过后台算法，快速计算出未巡检路段的补充巡检方案，再使用专业的巡检设备进行巡检。

2）巡检**数据**的结合：同时，两次巡检的数据都会进行处理，根据道路病害类型、道路病害面积和道路等级，生成不同的路段修复优先级，不同优先级适配不同的处理方案。

这种融合能够**显著提高巡检覆盖率**和**信息更新的及时性**，避免了因固定巡检车的限制导致的数据缺失、高成本问题，能够在最大程度上有效利用众包数据，使得巡检效益最大化。

7.1.2 路段修复优先级算法

本项目通过开发一套路段修复优先级评估算法，可以根据病害类型、面积和道路等级等多因素综合评估病害的严重程度以及对路段修复优先级进行排序。不同于传统养护工作中主观判断病害优先级的方式，本项目算法通过 YOLO11 视觉识别算法对病害进行自动分类和打分，确保了评估的科学性和合理性。尤其在病害种类繁多的情况下，该优先级算法能够显著**提高维护效率**，避免因人为判断误差带来的修复延误。

7.1.3 一键化报告生成系统

传统巡检报告依赖人工统计、汇总，**不仅耗时且易出错**。本项目基于 **Python-docx 库**开发的自动报告生成系统，可将巡检数据（如巡检路线、病害分布、修复优先级）整合成标准化报告。巡检人员可通过系统界面**一键生成报告**，便于定期汇总和分享。这一功能大幅减少了人工工作量，提供了便捷的统计分析工具，提升了管理效率。

7.2 项目优势

7.2.1 算法的准确性与高效性

项目应用了 Google Or-Tools VRP 问题求解器和 YOLO11 视觉识别算法，能够快速、准确地处理**大规模路网数据**和病害图像。Google Or-Tools 优化算法软件套件是国外成熟的用于组合优化的快速且可移植的开源软件套件，已经过**上百次实际应用检验**。其中的 VRP 问题求解器可以定期解具有数万个节点的 TSP 实例[19]。本项目通过 VRP（车辆路径问题）求解器生成最优巡检路径，可大幅度**减少巡检车辆行驶距离**，提高巡检效率。为评估求解器算法的收敛性、收敛速度、求解效果和稳定性，本项目输出了多车辆平均巡检距离随求解器算法迭代次数的变化（图 8）。结果表明，求解器算法的**收敛性、收敛速度、求解效果和稳定性均良好**。由于 Google Or-Tools VRP 问题求解器使用的是启发式算法，为评估算法找到的解的质量，本模块输出了最终巡检路径对于未巡检路径的覆盖率（图 10）。结果表明，多次实验下，最终巡检路径对于未巡检路径的**覆盖率较高**；算法不仅可以**快速地**完成路径规划，还可以找到**质量较高的次优解**。

此外，利用 YOLO11 视觉识别算法分析病害类型和分布，可**迅速生成路段修复优先级**，同时确保病害检测和修复的科学性。YOLO11 视觉识别算法具有较强的特征提取能力，高空间注意力，高适应性和优秀的性能表现[27]。YOLO11 对比不同的机器视觉识别算法，其**表现优异**（图 2）[36]。该系统在多次测试中表现出较高的准确率和稳定性，为实际应用奠定了技术基础。

7.2.2 系统的适用性与扩展性

本系统适用于城市道路、高速公路、乡村道路等多种场景，通过**灵活的模块化设计**，实现了多种道路类型的兼容性。同时，算法和数据接口具有**良好的扩展性**，未来可加入更多数据源（如无人机数据）和新算法，使系统不断进化。其广泛适用性能够满足不同场景下的巡检需求，有助于道路管理部门**提高作业效率**。

7.2.3 用户友好的界面与操作便捷性

项目采用网页应用设计，巡检人员可通过**直观的界面操作**，实时查看巡检路线、病害分布和修复建议。报告生成模块支持**一键导出巡检报告**，管理者可以快速掌握路网病害状况并决策。此便捷的操作使得系统适合不同层次的用户使用，降低了专业要求，提高了普及度。

八、 市场定位与分析

8.1 市场前景

8.1.1 行业需求的急剧增长

随着机动车保有量的持续增长及交通网络的日益复杂化，道路维护压力随之增大。根据交通运输部数据，我国机动车保有量已超过 4 亿，且未来几年预计将持续增长。道路损耗加剧，定期巡检需求愈发旺盛。同时，交通强国战略以及十四五交通领域科技创新规划中多次提到“交通基础设施全生命周期养护”，为道路智能巡检提供了政策支持。因此，**智能化、信息化**的道路巡检技术市场需求**前景广阔**。

8.1.2 市场对智能巡检技术的需求

传统道路巡检设备无法满足广泛的道路需求，尤其在城市密集路网和快速发展的高速路段，**智能化巡检的需求尤为迫切**。本项目的智能巡检系统提供了**高效、实时的道路检测能力**，填补了市场对自动化巡检的需求。预计未来 5 年内，随着智能巡检技术的不断成熟，此类巡检系统将迅速推广，逐渐取代传统的人工巡检模式。

8.2 市场规模

8.2.1 政府预算和行业投入增长

据《2023 年交通运输行业发展统计公报》统计，2023 年我国的公路里程已达 520 万公里，未来几年内仍将继续增长[37]。2023 年全国道路养护相关支出约 1600 亿元，占比逐年增加，反映出各地对公路养护的重视[37]。**国家交通强国战略**（图 15）明确提出支持智慧交通及道路信息化巡检技术的推广，为本项目的市场应用提供了广阔前景[38]。



图 18 交通运输部：加快建设交通强国[40]

8.2.2 商业化巡检系统的市场化潜力

目前智能道路巡检市场仅停留于专业车辆巡检，其**巡检车辆数量少、巡检路径不稳定，**

需要**耗费大量时间成本、人工成本、设备成本**[5]。利用本产品，在固定周期内利用商用车辆上搭载的视觉识别设备，对道路网进行巡检，并为其快速制定补充的专业道路巡检方案，较好的实现了社会化巡检力量和专业化巡检力量的结合互补，**降低了专业巡检的成本**，使**社会化巡检结果更具有实用价值**。粗略估计全国公路巡检一次人工成本在 25 亿人民币之内，单套智能巡检采集设备成本不足 8000 元。可利用商用车辆（或公交车、校车）进行巡检后，平均每公里采集数据不足 4 分钟，大大降低了巡检成本，工作效率比纯人工检查提高约 8 倍至 10 倍。且使用门槛低，一线养路工人经过简单培训即可使用，利润空间广阔。

参考文献

[1]谭佩思,尹应梅,申晓明.智慧市政巡检在市政道路病害管理中的应用与效果分析[J].价值工程,2024,43(14):11-13.

[2]孔学玉,毛永强,殷耀坤.浅析道路养护智能化建设研究[J].石河子科技,2023(06):49-50.

[3]肖顺舟.基于数据挖掘的路面预防性养护决策的研究与实 现[D].武汉理工大学，2018.

[4]王九胜,林报嘉,周成."互联网+道路养护平台"建设关键技术分析[J].公路,2020,65(05):300-304.

[5]童言慧. 求解不确定环境下车辆路径问题的进化算法研究[D].安徽大学,2022.DOI:10.26917/d.cnki.ganhu.2022.000385.

[6]张月.基于行车记录仪的高速公路路面状况巡查及报警系统[J].交通与运输,2019,35(04):54-57.

[7]傅志浩，汪琦，胡晓克 ．展望普通公路智能养护的未来[J]．中国公路，2018，（12）：60－61.

[8]杨盼盼.智慧交通下的智能道路养护分析[J]. 智能城市，2021（1）：128-129.

[9]闫玉芳.智慧交通下的智能道路养护分析[J].智能建筑与智慧城.市,2024,(05):180-182.DOI:10.13655/j.cnki.ibci.2024.05.056.

[10]Guan J, Yang X, Liu P, et al. Multi-scale asphalt pavement deformation detection and measurement based on machine learning of full field-of-view digital surface data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 152: 104177.

[11]Liu J, Yang X, Lau S, et al. Automated pavement crack detection and segmentation based on two‐step convolutional neural network[J]. Computer‐Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(11): 1291-1305.

[12]Pan Z, Guan J, Yang X, et al. One-stage 3D profile-based pavement crack detection and quantification[J]. Automation in Construction, 2023, 153: 104946.

[13]Pourgholamali M, Labi S, Sinha K C. Multi-objective optimization in highway pavement maintenance and rehabilitation project selection and scheduling: A state-of-the-art review[J]. Journal of Road Engineering, 2023.

[14]Yang X, Guan J, Ding L, et al. Research and applications of artificial neural network in pavement engineering: a state-of-the-art review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021, 8(6): 1000-1021.

[15]Zhang J, Yang X, Wang W, et al. Automated guided vehicles and autonomous mobile robots for recognition and tracking in civil engineering[J]. Automation in Construction, 2023, 146: 104699.

[16]Yang X, Zhang J, Liu W, et al. Automation in road distress detection, diagnosis and treatment[J]. Journal of Road Engineering, 2024.

[17]Wang H S, Liu S S. Road Inspection Scheduling Model Using Constraint Programming[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 357: 2720-2725.
[18]Li Y, Gao S, Liu X, et al. An Efficient Path Planning Method for the Unmanned Aerial Vehicle in Highway Inspection Scenarios[J]. Electronics, 2023, 12(20): 4200.
[19]Google for Developers. Routing Options[EB/OL].(2024-8-28)[2024-11-5]. https://developers.google.cn/optimization/routing/routing_options.
[20]Woo S, Yeo H. Optimization of pavement inspection schedule with traffic demand prediction[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2016, 218: 95-103.
[21]Mandal V, Mussah A R, Adu-Gyamfi Y. Deep learning frameworks for pavement distress classification: A comparative analysis[C]//2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). IEEE, 2020: 5577-5583.
[22]Dantzig G B, Ramser J H. The truck dispatching problem[J]. Management science, 1959, 6(1): 80-91.
[23]Michiels W, Aarts E, Korst J. Theoretical aspects of local search[M]. Berlin: Springer, 2007.
[24]Voudouris C. Guided local search for combinatorial optimisation problems[D]. University of Essex, 1997.
[25]Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. Numerische Mathematik, 1959, 1: 269–271 [2020-01-27].
[26]Haeupler B, Hladík R, Rozhoň V, et al. Universal Optimality of Dijkstra via Beyond-Worst-Case Heaps[J]. arXiv preprint arXiv:2311.11793, 2023.
[27]Ultralytics Inc. YOLO11 Docs[EB/OL]. 2024. https://docs.ultralytics.com/zh.
[28]Steve Canny. Python-docx 1.1.2 Documentation[EB/OL]. 2013. https://python-docx.readthedocs.io/en/latest/.
[29]深圳亿维. 道路 AI 智能巡检养护系统介绍[EB/OL]. 2024. https://its.yiview.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=128&id=364.
[30]GeoPandas developers. Introduction to GeoPandas[EB/OL]. 2013-2024. https://geopandas.org/en/stable/getting_started/introduction.html.
[31]Hagberg A, Swart P J, Schult D A. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX[R]. Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM (United States), 2008.
[32]West D B. Introduction to graph theory[M]. Upper Saddle River: Prentice hall, 2001.
[33]济南铁路运输法院，澎湃新闻. 路面凹陷引发单方交通事故，道路管理者需担责吗？[EB/OL]. 2022. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_20693998.
[34]鹅斯基，知乎. 自动驾驶感知技术新的应用场景——智能道路巡检[EB/OL]. 2021. https://zhuanlan.zhihu.com/p/345407101.

[35]OpenStreetMap Foundation. Open Street Map[EB/OL]. 2024. https://www.openstreetmap.org/.

[36]Alif M A R. YOLOv11 for Vehicle Detection: Advancements, Performance, and Applications in Intelligent Transportation Systems[J]. arXiv preprint arXiv:2410.22898, 2024.

[37]交通运输部. 2023 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. 2024. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html.

[38]国务院. “十四五”现代综合交通运输体系发展规划[EB/OL]. 2021. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049.htm.

[39]岳涛@心馨电脑, CSDN. 详解 Python-docx 自动生成 word 图文报告[EB/OL]. 2021. https://blog.csdn.net/yuetaope/article/details/119444970.

[40]央视网. 交通运输部：加快建设交通强国[EB/OL]. 2023. https://news.cctv.com/2023/02/23/ARTI8BMk9miWrQImHafWUoAN230223.shtml

[41]云南航天工程物探检测股份有限公司. 道路车载巡检系统[EB/OL]. 2017-2023. https://www.aeroiot.cn/vehicleradar.

[42]交通运输部.“十四五”交通领域科技创新规划政策解读[EB/OL]. 2022. https://www.mot.gov.cn/zhuanti/shisiwujtysfzgh/202204/t20220408_3650010.html.

[43]Deeksha Arya, Hiroya Maeda, Yoshihide Sekimoto. From global challenges to local solutions: A review of cross-country collaborations and winning strategies in road damage detection[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 60: 102388. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102388.

[44]Deeksha Arya, Hiroya Maeda, Sanjay Kumar Ghosh, Durga Toshniwal, Yoshihide Sekimoto. RDD2022: A multi-national image dataset for automatic Road Damage Detection[EB/OL]. arXiv preprint arXiv:2209.08538, 2022.

[45]交通运输部公路科学研究院. 公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S]. 北京：中华人民共和国交通运输部, 2018.

作者贡献声明

吴宗河：开发项目所需的算法模块，进行试验，研究报告最终版本修订；

游裕添：采集、清洗和分析数据；开发项目道路路面病害数据获取模块；

林辰新：研究报告起草；联系导师

刘子通，胡君豪：研究报告起草；

周文康：开发项目网页应用界面模块；

王茵：提供项目研究过程中的技术保障；

付鑫：提出研究思路，设计研究方案。